

Capítulo 6

Elementos no lineales

Se dice que un elemento pasivo es no lineal cuando la caída de potencial entre sus extremos, ΔV , y la corriente I que por él circula, no guardan entre sí una relación de proporcionalidad directa.

6.1. Lámpara incandescente

Una lámpara incandescente es un elemento no lineal puesto que la resistencia de su filamento depende de la temperatura, T , del mismo, y esta a su vez depende, entre otras variables, de la corriente que por él circule; de modo que no se puede establecer una relación de proporcionalidad directa entre la diferencia de potencial, ΔV , que se aplique entre sus extremos y la corriente circulante, I .

En primera aproximación, se puede afirmar entonces que en lugar de la relación $\Delta V = R I$, que es lineal sólo para resistencias R constantes, en el caso de la lámpara incandescente correspondería escribir, por ejemplo, $\Delta V = R[T(I)] I$.

$$\Delta V = R(I) I \tag{6.1}$$

En la parte experimental de esta práctica se determinará la curva $I - V$ de una lámpara incandescente.

6.1.1. Resistencia dinámica

Dado un elemento de circuito para el que la relación entre la caída de potencial ΔV entre sus extremos y la corriente I que entre ellos circula puede describirse mediante una

expresión diferenciable del tipo

$$F(\Delta V, I, \mathbf{p}) = 0 \quad (6.2)$$

siendo \mathbf{p} un conjunto de parámetros externos, como la temperatura, presión o las propiedades de la luz con que se lo ilumine, por ejemplo, que a su vez pueden depender de ΔV y/o de I , se define la *resistencia dinámica* R_D del elemento como

$$R_D = \frac{d\Delta V}{dI} \quad (6.3)$$

Nótese que a pesar de que R_D tiene unidades de Ohm, no se comporta como una resistencia pura en el sentido de la Ley de Ohm. Conoce algún otro elemento de circuito cuyo valor sea expresable en unidades de Ohm y que no sea una resistencia pura?

6.2. Diodos

6.2.1. Diodo común

El *diodo* es un importante elemento no lineal que permite la circulación de corriente en un solo sentido. Esto significa, por ejemplo, que si entre sus terminales se aplica tensión alterna, sólo circulará corriente a través de él, en la mitad de los semiciclos.

El símbolo circuital, un esquema de su aspecto físico y la convención de signos para la polaridad de la tensión aplicada y el sentido de circulación de la corriente pueden verse en la figura 6.1.

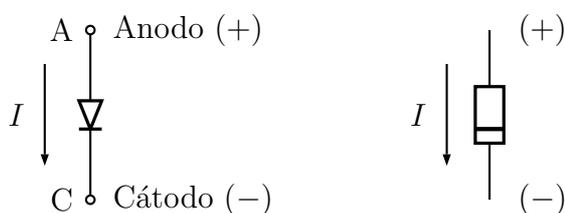


Figura 6.1: Representación gráfica de un diodo común. Izquierda: Símbolo circuital. Derecha: Esquema de su aspecto físico. En ambos casos se indica la convención para la polaridad de la tensión aplicada y la circulación de corriente.

Cuando la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo de un diodo, $V_{AC} = V_A - V_C$, es positiva (negativa), se dice que se encuentra en polarización directa (inversa).

En el caso de los diodos ideales, cuando la polarización es directa, circula corriente a través de ellos; y cuando es inversa, no. En polarización directa no ofrecen resistencia al paso de la corriente, por lo que la correspondiente curva característica es como la ilustrada en la figura 6.2(a). Bajo estas premisas puede concebirse los como una llave ideal, ya sea cerrada o abierta, dependiendo de que la polarización sea directa o inversa, respectivamente.

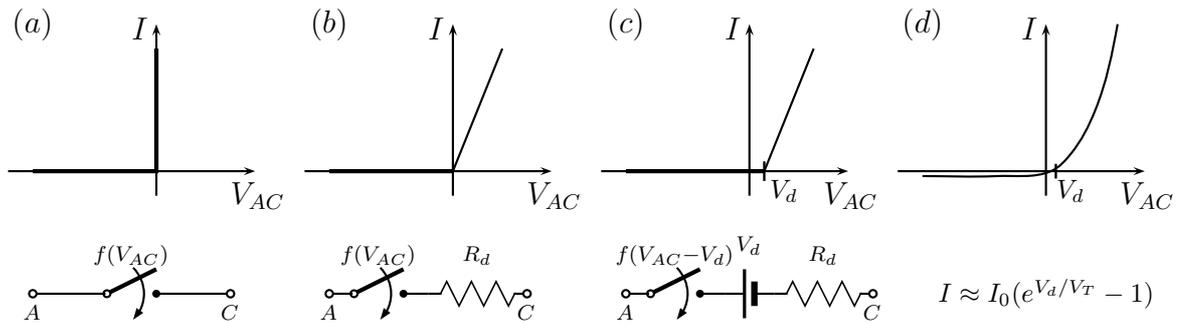


Figura 6.2: Curvas características correspondientes a tres grados diferentes de idealización de un diodo (a, b y c) y a un diodo real (d). En este último caso, la escala del semieje $I < 0$ fue ampliada a fin de ilustrar la corriente de fuga.

Un modelo más ajustado a la realidad se muestra en la figura 6.2(b), donde se considera la existencia de una resistencia interna R_d (constante, en primera aproximación) que el diodo presenta bajo polarización directa.

Para los diodos reales en polarización directa existe además cierto valor umbral de tensión por debajo del cual no circula corriente significativa. Dicho valor, simbolizado V_d y denominado *tensión umbral*, se ubica aproximadamente entre 0.6 y 0.7 V, y se destaca en la figura 6.2(c).

En polarización inversa los diodos reales presentan una pequeña circulación de corriente, del orden de los $10 \mu\text{A}$ o menor, según el tipo de diodo. Se la denomina *corriente de fuga*, o *corriente inversa*, y se la suele simbolizar como I_R (reverse current). A la corriente que circula cuando el diodo está polarizado en sentido positivo se la denomina *corriente directa* y se la simboliza I_F (forward current). La correspondiente curva característica puede verse en la figura 6.2(d), y su forma funcional aproximada, debida a *W. Shockley* se expresa

$$I \approx I_0 (e^{V_{AC}/V_T} - 1) \quad (6.4)$$

donde I_0 es del orden de los nA, o menor, y $V_T \approx 26 \text{ mV}$ a temperatura ambiente. Estos valores, especialmente I_0 , dependen del tipo de diodo considerado.

Observe que la pendiente m de la curva característica, cuando dicha pendiente existe, es la inversa de la resistencia dinámica R_{AC} que el diodo presenta entre sus terminales, esto es: $m = 1/R_{AC}$. De la figura 6.2(d) se desprende que la resistencia dinámica de un diodo real es variable.

Los diodos comunes de uso más frecuente son los de la denominada serie *1N4000*. Pueden conducir hasta 1 A de corriente directa ($I_{F_{Máx}} = 1$ A), y soportan las tensiones inversas máximas, $V_{R_{Máx}}$, consignadas en la Tabla 6.1. Para obtener más información sobre las especificaciones técnicas de estos diodos, consulte la hoja de datos correspondiente.

| Diodo | 1N4001 | 1N4002 | 1N4003 | 1N4004 | 1N4005 | 1N4006 | 1N4007 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $V_{R_{Máx}}$ (V) | 50 | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 |

Tabla 6.1: *Tensiones inversas máximas que soportan los diodos de la serie 1N4000. Todos ellos pueden conducir hasta 1 A de corriente directa y tienen una corriente de fuga de $\sim 10 \mu\text{A}$.*

6.2.2. Diodo rápido

La *velocidad de conmutación* de un diodo real, esto es, la velocidad con que puede pasar del estado de no-conducción al de conducción o viceversa, es limitada. Esto significa, por ejemplo, que si a un diodo real que está en estado de no-conducción porque la diferencia de potencial entre sus extremos es nula, se le aplica subitamente una polarización positiva, no pasará instantáneamente al estado de conducción.

Debido a la importancia de aplicaciones tales como computación y comunicaciones, en las que se presta especial atención a la velocidad de procesamiento, se desarrollaron diodos de conmutación rápida comparada con la correspondiente a los diodos comunes estudiados en la sección anterior.

En la parte experimental de esta práctica se medirá la velocidad de conmutación de un diodo común y de uno rápido (el 1N4148). La curva característica de los diodos rápidos es similar a la de los diodos comunes, pero suelen tener menor capacidad de conducir corriente y soportan menores tensiones inversas sin destruirse. Para el caso del diodo 1N4148 los correspondientes valores son: $I_{F_{Máx}} = 200$ mA y $V_{R_{Máx}} = 100$ V.

6.2.3. Diodo Zener

El Zener es un diodo especial cuya *curva característica* se ilustra en la figura 6.3.

En la zona de polarización directa el Zener se comporta como un diodo común, pero cuando es polarizado en inversa existe una tensión, V_Z , denominada *tensión Zener* o

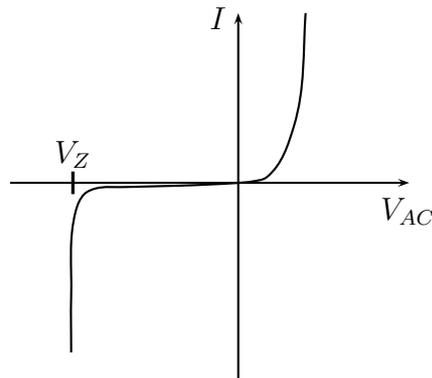


Figura 6.3: Curva característica de un diodo Zener real.

tensión de ruptura, en la que el diodo permite la circulación de corriente sin que varíe, prácticamente, la caída de tensión entre sus extremos.

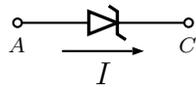


Figura 6.4: Símbolo circuital de un diodo Zener.

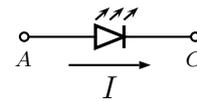


Figura 6.5: Símbolo circuital de un diodo LED.

Esto permite emplearlo como referencia de tensión, dado que polarizado en inversa en un circuito adecuado, la caída de potencial entre sus extremos es prácticamente independiente de la corriente que por él circule.

El símbolo circuital de un diodo Zener se ilustra en la figura 6.4.

Las dos especificaciones más importantes de un Zener son: la tensión de ruptura V_Z y la potencia máxima que puede disipar P_D en inversa. A partir de estos valores se puede determinar la máxima corriente que puede conducir en inversa sin destruirse: $I_{Z_{\text{Máx}}} = P_D/V_Z$. Los valores típicos más comunes son $3.3\text{ V} \leq V_Z \leq 200\text{ V}$, mientras que las potencias de los Zeners de uso más frecuente suelen ser: 0.2, 0.5 o 1 W.

6.2.4. Diodo LED

El diodo LED (Light Emitting Diode, o diodo emisor de luz) tiene la particularidad de emitir luz cuando está en estado de conducción. Los colores fácilmente disponibles en la actualidad son rojo, amarillo, verde y azul, pero también existen LEDs que emiten en el infrarrojo y el ultravioleta. Para distinguirlos entre sí, se habla entonces de LEDs rojos, amarillos, verdes, etc. El símbolo circuital se ilustra en la figura 6.5.

Desde el punto de vista eléctrico los LEDs presentan curvas características parecidas a las de los diodos comunes. La principal diferencia entre ellas es el valor de la tensión umbral, V_d , que para los LEDs resulta ser mayor que la correspondiente a los diodos comunes y dependiente del color. Para LEDs rojos se tiene, típicamente, $1.6\text{ V} \leq V_d \leq 2.0\text{ V}$, mientras que para los azules resulta: $2.5\text{ V} \leq V_d \leq 3.7\text{ V}$.

La capacidad de conducir corriente cuando están polarizados en directa depende del tamaño del LED. Normalmente se pueden conseguir LEDs que trabajan desde 2 mA (los más pequeños) hasta 50 mA. Si se exceden dichos valores, la vida útil del dispositivo se reduce considerablemente, o se quema al instante, dependiendo de la magnitud del exceso.

La amplitud de la tensión inversa que pueden soportar sin dañarse es muy inferior a la de los diodos comunes: los LEDs normalmente se destruyen si $V_{AC} < -5\text{ V}$.

6.3. Preguntas

1. (Resuelva esto, por favor) Suponga que en un circuito hay un elemento no lineal. Qué es lo que se convierte en no lineal: el circuito propiamente dicho, o todos y cada uno de sus elementos?
2. En la Sección 6.1: Lámpara incandescente, se afirmó que la resistencia del filamento depende de su temperatura, y ésta, de la corriente que por él circule. Bajo estas hipótesis se expresó: $V = R(I) I$, lo que no deja de ser una primera aproximación a la expresión que vincula V con I para este elemento. Haga una lista de posibles mejoras a dicha aproximación, incorporando otras variables, por ejemplo, y exprese las matemáticamente.
3. Suponga que encuentra una región en el plano $I - V$ en que la resistencia R del filamento de una lámpara incandescente varía linealmente con la corriente I que por él circula, esto es, encuentra que: $R = k I$, $k \neq 0$. Se comporta la lámpara, en tal caso, como un elemento lineal en dicha región?.
4.
 - a) Son los cables ideales elementos lineales?
 - b) Por qué no se los incluye, explícitamente, en las ecuaciones de circuito?
 - c) Responda las dos preguntas anteriores para el caso de cables reales.
5. Cuando se consideraron sucesivas aproximaciones a la curva característica de un diodo común (figura 6.2), se expusieron esquemas circuitales sencillos vinculados a cada uno de los tres primeros casos. Qué esquema propondría Ud. para el cuarto?
6. Coincide siempre la resistencia total entre ánodo y cátodo de un diodo, R_{AC} , con R_d ?

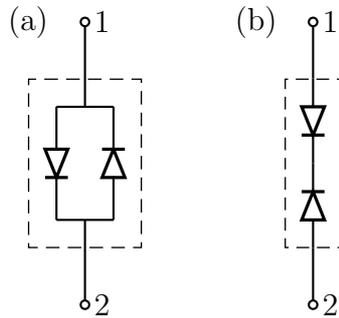


Figura 6.6: Diodos en contraposición conectados en paralelo (a) y en serie (b). (Pregunta 7).

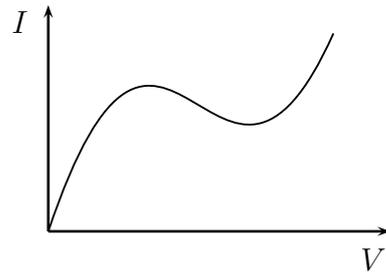


Figura 6.7: Una curva característica arbitraria. (Pregunta 9).

7. En la sección 6.2.1 se analizaron cuatro posibilidades de creciente complejidad, para modelar el comportamiento de un diodo común. Considere ahora los circuitos de la figura 6.6, en la se ilustra un par de diodos conectados en contraposición ya sea en paralelo (a) o en serie (b). Modele ambas configuraciones según cada una de las cuatro posibilidades consideradas para un solo diodo. Para ello defina $V_{12} \equiv V_1 - V_2$, asuma como positiva la corriente que circule desde el terminal 1 al 2, grafique las curvas características $I-V_{12}$ y esquematice los correspondientes modelos circuitales.
8. Cómo representaría la curva característica de un diodo Zener ideal?
9. Qué aspecto destacaría, preponderantemente, de la curva característica presentada en la figura 6.7?
10. Cuáles cree que pueden ser las razones por las que la tensión umbral de un LED depende del color de los fotones que emite?
11. Vale el principio de superposición para circuitos que contengan elementos no lineales?

6.4. Parte experimental

6.4.1. Lámpara incandescente

1. Diseñe y arme un circuito que le permita trazar la curva $I - V$ de la lámpara incandescente que tenga a su disposición. Como fuentes de alimentación podrá emplear una fuente de tensión continua y/o una de alterna. Luego de medir lo

necesario, grafique e interprete la curva $I-V$ y la resistencia dinámica de la lámpara. Identifique, si es que existen, zonas en donde la lámpara pueda llegar a considerarse como un elemento lineal.

Observaciones y preguntas:

- Cree que obtendrá la misma curva característica si emplea una fuente de tensión continua o una de alterna?.
- Si planifica cuidadosamente el experimento no le será difícil obtener datos suficientes, y en un tiempo breve, que le permitan responder con sustento experimental la pregunta anterior.
- En caso de que obtenga curvas diferentes, cree Ud. que podrían condensarse en una sola mediante adecuados cambios lineales de escalas?
- Si lo desea, pruebe también con señales triangulares o cuadradas.

6.4.2. Diodos

Caracterización

- Arme un circuito como el de la figura 6.8. Determine cuidadosamente el valor de la resistencia R para no quemar al diodo ni al transformador. Conecte las puntas de medición del osciloscopio a los puntos A, B y GND (piense cómo lo va a hacer) y colocando al instrumento en modo X-Y, observe en la pantalla la curva característica de un diodo común.

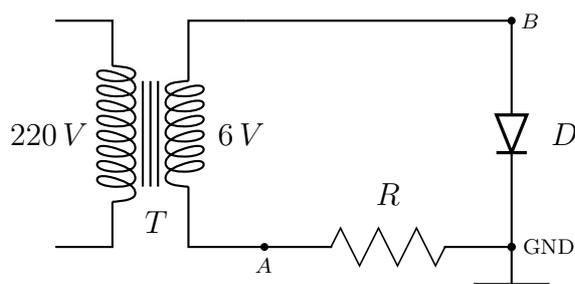


Figura 6.8: *Circuito propuesto para trazar la curva característica de un diodo en un osciloscopio.*

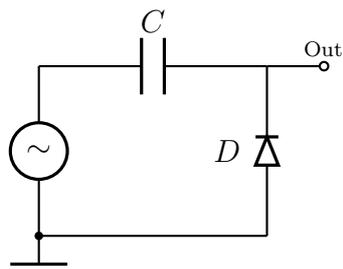
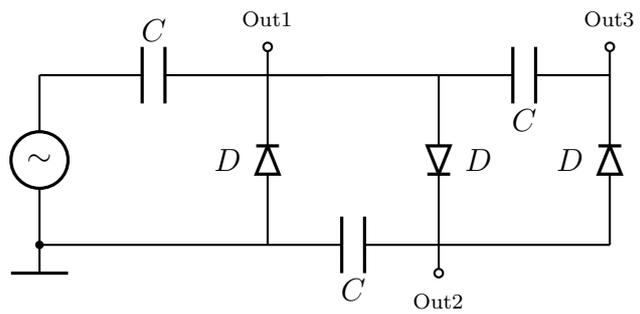
Observaciones y preguntas:

- Mida mediante los cursores del osciloscopio la caída de tensión necesaria para que el diodo comience a conducir. Observe que para medir correctamente esta cantidad debe conocer la ubicación, en la pantalla de osciloscopio, del origen de coordenadas del plano $I-V$. Piense cómo hacer para determinar dicho origen experimentalmente.

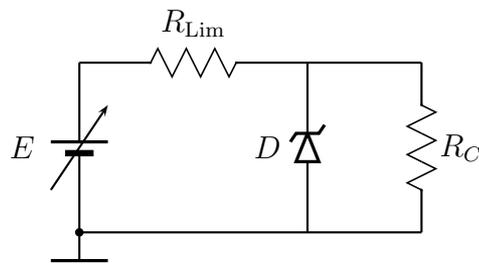
- b) Adquiera las señales que necesite para graficar la curva característica del diodo y determine su resistencia dinámica.
 - c) Ajuste la expresión de Shockley (ecuación (6.4)) a la curva característica medida, obtenga I_0 y V_T , y compárelos con los valores dados.
 - d) Por qué se debe usar un transformador y no un generador de funciones?
2. Con el circuito anterior estudie un diodo Zener. Asegúrese de que la amplitud de la tensión de salida del transformador sea suficiente como para polarizarlo correctamente en inversa. Determine la tensión de ruptura y la resistencia dinámica en las zona de polarización directa y de ruptura.
 3. Con el circuito anterior estudie ahora un diodo 1N4148 y de LEDs de diferentes colores. Para no quemar ningún diodo, tenga presente las limitaciones de corriente de los mismos.
 4. Modifique el circuito anterior para comprobar experimentalmente sus modelos de las configuraciones ilustradas en la figura 6.6.
 5. **Velocidad de conmutación.** Diseñe y arme un circuito que le permita medir la velocidad de conmutación de un diodo de la serie 1N4000, un 1N4148, un Zener y un LED. Verifique si dicha velocidad es la misma (en módulo) al pasar del estado de no conducción al de conducción o viceversa.

Aplicaciones

1. **Circuito clamper.** Dado el circuito de la figura 6.9 prediga conceptualmente cuál será la salida V_{out} medida respecto de tierra. Armelo y mida V_{out} . Simule el circuito computacionalmente, interprete los tres resultados, compárelos entre sí, y explique las eventuales diferencias. **No desarme el circuito.**
Para qué cree que puede servir un circuito como el de la figura 6.9?
Analice cómo se modifica la tensión V_{out} si se conecta una resistencia de carga entre dicho terminal y tierra.
Determine qué ocurre si en lugar de emplear una fuente senoidal, se aplica una fuente de tensión continua, triangular o cuadrada.
2. **Elevador de tensión.** Complete el circuito anterior hasta armar el de la figura 6.10 y estudie cada una de las tensiones de salida Out 1, 2 y 3, medidas respecto de tierra. Simule el circuito y compare los resultados de la simulación con el experimento. Estudie cómo cambia la tensión de salida si se conecta una resistencia de carga.
3. **Regulación de tensión mediante un diodo Zener:** Arme un circuito como el de la figura 6.11 y estudie la variación de la caída de tensión sobre la resistencia de carga cuando se varía:

Figura 6.9: *Circuito clamper.*Figura 6.10: *Circuito elevador de tensión.*

- la tensión de la fuente
- la resistencia de carga R_C .

Figura 6.11: *Regulador de tensión basado en un diodo Zener.*

Compare ambos resultados con los que se obtendrían en caso de no incluir el Zener en el circuito.